

Optical fibre laser or fibre amplifier with refraction factor structure

Patent number: DE19620159

Publication date: 1997-11-13

Inventor: UNGER SONJA DR (DE); KIRCHHOF JOHANNES DR (DE); MUELLER HANS-RAINER DR (DE); REICHEL VOLKER DIPL PHYS (DE); TUENNERMANN ANDREAS DR (DE); ZELLMER HOLGER DIPL PHYS (DE)

Applicant: INST PHYSIKALISCHE HOCHTECH EV (DE), LZH LASERZENTRUM HANNOVER EV (DE)

Classification:

- **International:** H01S3/0941, H01S3/16

- **European:** H01S3/067C

Application number: DE19961020159 19960507

Priority number(s): DE19961020159 19960507

Abstract of DE19620159

The fiber laser includes a fiber core having a laser-active material, a light pump coating surrounding the core, and a coating surrounding the light pump coating. The fiber core is enclosed concentrically by the light pump coating which comprises a course of its refraction factor which is similar to a parabola at least nearby the fiber core, preferably up to a distance of the 20-fold of the diameter of laser fiber core.

Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑯ Patentinhaber:

Institut für Physikalische Hochtechnologie e.V.,
07745 Jena, DE; LZH Laserzentrum Hannover e.V.,
30419 Hannover, DE

⑯ Vertreter:

R.-G. Pfeiffer und Kollegen, 07745 Jena

⑯ Erfinder:

Kirchhof, Johannes, Dr., 07743 Jena, DE; Müller, Hans-Rainer, Dr., 07743 Jena, DE; Reichel, Volker, Dipl.-Phys., 07743 Jena, DE; Tünnermann, Andreas, Dr., 30177 Hannover, DE; Unger, Sonja, Dr., 07743 Jena, DE; Zellmer, Holger, Dipl.-Phys., 30419 Hannover, DE

⑯ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 195 35 526 C1

US 54 88 506

US 48 15 079

WO 95 31 020 A1

WO 95 10 869 A1

ZELLMER, H. u.a.: High-power cw

neodymium-doped
fiber laser operating at 9.2 W with high beam
quality. In US-Z.: Optics Letters, Vol. 20,
No. 6, 1995, S. 578-580;

GEITTNER, P.; LYDTIN, H.: Manufacturing optical
fibres by the PCVD process. In: Philips Tech.Rev.,
Vol. 44, No. 8/9/10, 1989, S. 241-249;

⑯ Faserlaser oder Faserverstärker mit neuartiger Brechzahlstruktur

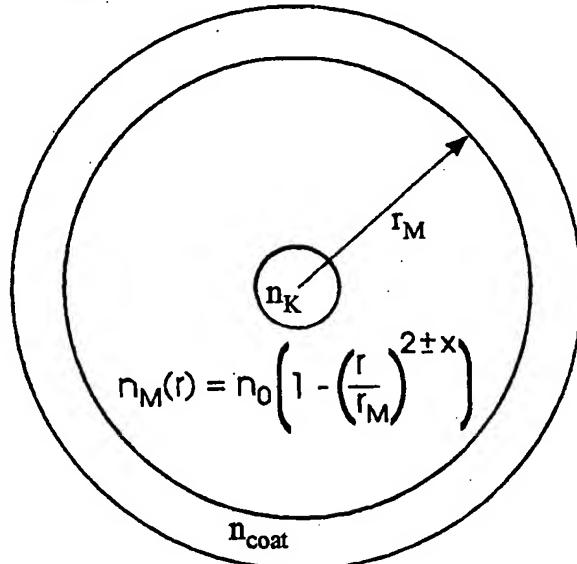
⑯ Faserlaser oder Faserverstärker, bestehend aus einem mit laseraktivem Material dotierten Faserkern, einem diesen umfassenden Pumplichtmantel und einer den Pumplichtmantel umgebenden Ummhüllung, wobei der Faserkern konzentrisch von dem Pumplichtmantel umfaßt ist und dem Pumplichtmantel zumindest in der Nähe des Laserfaserkerns ein parabelähnlicher Brechzahlverlauf gegeben ist, dadurch gekennzeichnet, daß der parabelähnliche Brechzahlverlauf mindestens bis zu einem Abstand, beginnend von der Außenseite des Faserkerns, vom 20fachen des Fasererndurchmessers des Faserlasers oder Faserverstärkers im Pumplichtmantel derart vorgesehen ist, daß der Brechzahlverlauf zumindest in der Nähe des Faserkerns gemäß einer Beziehung:

$$n_M(r) = n_0 \left[1 - \left(\frac{r}{r_M} \right)^{2 \pm x} \right]$$

festgelegt ist, wobei n_M die Brechzahldifferenz zum den Pumplichtmantel umgebenden Medium beschreibt, n_0 für die maximale Brechzahldifferenz in unmittelbarer Angrenzung an den Laserfaserkern steht und x Werte von bis zu $\pm 0,2$ annehmen kann und zusätzlich dem Faserlaser oder Faserverstärker in Ausbreitungsrichtung der Laserstrahlung in zumindest einem ausgewählten Teilgebiet des Pumplichtmantels eine Störung aufgeprägt ist, die mit einer Periode Λ vorgesehen ist, die der Bedingung:

$$\beta_{lm} - \beta_{kn} = 2 \cdot \pi / \Lambda \text{ mit } l, m, k, n = 1, 2, \dots,$$

wobei β_{lm} , β_{kn} für Ausbreitungskonstanten unterschiedlicher Moden stehen, genügt.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Faserlaser oder Faserverstärker mit einer neuartigen Brechzahlstruktur, die eine hocheffiziente Pumplichtinkopplung in eine laseraktive Faser gewährleistet.

[0002] Faserlaser oder Faserverstärker kann man realisieren, indem man das erforderliche Pumplicht direkt in einen aktiven, also mit Laserionen wie Neodym, Erbium o. ä. dotierten Faserkern einkoppelt. Dazu ist der Laserfaserkern von einem lichtführenden Mantel umgeben, in den das Pumplicht eingekoppelt wird. Pumpl- und Laserlicht breiten sich gemeinsam in dem lichtführenden, laseraktiven Kernbereich aus, der einen höheren Brechungsindex gegenüber dem umgebenden Pumplichtmantel aufweist. Obwohl die Kopplung zwischen Pump- und Laserlicht in diesem Falle hinreichend ist und damit eine hohe Konversionseffizienz erreicht werden kann, ergeben sich bei einer solchen Struktur eine Reihe von Nachteilen. So haben viele Pumplichtquellen, insbesondere Diodenlaser, Strahlungseigenschaften, die nur einen geringen Teil des emittierten Lichtes in den kleinen Lichtleiterkern (üblicherweise einige μm Durchmesser) einzukoppeln gestatten. Wenn man höhere Lichtintensitäten erreichen will, muß man zudem das Pumplicht sehr stark fokussieren, was oft zu Beschädigungen der Faserendfläche und damit zum Ausfall des Faserlasers führt.

[0003] US-PS 5,488,506 beschreibt einen Multimoden-Faserlaser, bei dem ausschließlich im laseraktiven Faserkern eine Brechzahlvariation vorgesehen ist. Dieser Faserlaser weist, wie auch andere bekannte Doppelkern-Faserlaser, im Pumpmantel eine konstante Brechzahl auf. Demzufolge entsteht dort das Problem, daß sich sehr viele Moden bei der Laserwellenlänge ausbreiten und sich beim Austritt aus der Faser ungünstig überlagern können (destructive Interferenz, zeitlich instabile Intensität, Laufzeitdifferenz).

[0004] In der WO 95/10869 A1, aus der der Oberbegriff des Patentanspruchs 1 bekannt ist, ist ganz allgemein das Vorsehen eines Brechzahlgradienten in einem Pumplichtmantel beschrieben, wobei der Laserfaserkern und der Pumplichtmantel zueinander konzentrisch angeordnet sind und dem Laserfaserkern als auch dem Pumplichtmantel unterschiedliche Geometrien, bspw. kreisförmige, elliptische oder quadratische, gegeben sein können. Diese Lösungen verbessern zwar die Einkopplung, führen in dieser allgemeinen Form aber nicht zu einer vollständigen Absorption des Pumplichts in der Faser.

[0005] Weiterhin ist zur besseren Durchmischung des Pumplichts auch die Einführung periodischer Krümmungen in eine Faser vorgeschlagen worden; Zellmer, H. u. a. "High-power cw neodymium-doped fiber laser operating at 9,2 W with high beam quality", Optics Letters, Vol. 20, No. 6, 1995, S. 578–580.

[0006] In WO 95/31020 A1 wird ein Beugungsgitter in den aktiven Faserkern eingeschrieben, um die Laserwirkung auf eine bestimmte Wellenlänge einzuengen, was jedoch die Effizienz der Umwandlung von Pumplicht in Laserlicht nicht verbessert.

[0007] Eine gewisse Verbesserung bringt ein in US-PS 4,815,079 vorgeschlagenes Prinzip, das Pumplicht in den Mantel mit einer konstanten Brechzahl n_M einzukoppeln; dieser Mantel umgibt einen Kern mit der Brechzahl $n_K > n_M$ und muß seinerseits nach außen mit einem Medium $n_{CoS} < n_M$ begrenzt sein, um die Führung des Lichtes im Pumplichtmantel zu gewährleisten; die diesbezüglichen Brechzahlverläufe sind in Fig. 1c dargestellt. Um eine wirksame Kopplung des Pumplichts mit dem Kern zu erzielen, soll dabei der Kern exzentrisch in dem Mantel liegen. Wie aus Fig. 1a ersichtlich ist, werden dann auch die Strahlen im Kern absorbiert, die nicht durch das Zentrum des Mantels laufen, was üblicherweise den Hauptteil der Moden betrifft. Nachteil dieser Anordnung ist aber, neben dem schwierigen und aufwendigen Herstellungsverfahren, die schlechte Verbindbarkeit dieser Laserfaser mit weiteren herkömmlichen Fasern mit einem zentrisch angeordneten Kern. Außerdem tritt ein Teil der Strahlen nach wie vor überhaupt nicht mit dem laseraktiven Kern in Wechselwirkung, wie es aus Fig. 1b ersichtlich ist. Die gleichen Nachteile treten auch bei rechteckiger Form des Pumpcladdings auf, die ebenfalls in US-PS 4,815,079 beschrieben sind. Die Schwierigkeit der Herstellung und der Verbindung mit anderen Fasern ist dabei sogar noch größer. Teilweise werden diese Nachteile durch eine Erfindung beseitigt, bei der ein Teil des Mantels so abgeschliffen wird, daß der Mantel eine D-förmige Gestalt erhält, vergl. die auf einer älteren Anmeldung beruhende DE 195 35 526 C1. Dadurch mischen sich die Strahlen besser, und ein größerer Anteil des Pumplichtes kommt mit dem Kern in Wechselwirkung. Bei diesem Vorschlag bleibt allerdings der Nachteil zusätzlicher, aufwendiger Herstellungsschritte gegenüber runden Strukturen und weiterhin die Abweichung von einer Zylindersymmetrie.

[0008] Wie sich Brechzahlgradienten, insbesondere parabelförmige, in Multimodefasern erzeugen lassen, ist seit langem bekannt und bspw. in Geitner, P.; Lydtin, H. "Manufacturing optical fibres by the PCVD process", Philips Tech. Rev., Vol. 44, No. 8/9/10, 1989, S. 241–249 beschrieben.

[0009] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Faserlaser oder Faserverstärker anzugeben, der die genannten Nachteile herkömmlicher Faserlaser beseitigt, der einfach herstellbar ist, eine für die Verbindung zu weiteren, lichtleitenden Fasern erforderliche Geometrie, insbesondere eine Zylindersymmetrie, aufweist, bei dem das Pumplicht ohne zu starke Fokussierung in den Kern eingekoppelt werden kann und der eine im wesentlichen vollständige Absorption des Pumplichtes im Kern ermöglicht.

[0010] Das Wesen der Erfindung besteht darin, daß eine als Laserfaser ausgebildete Kernfaser konzentrisch von einem runden Pumplichtleiter umfaßt ist, dem, im Gegensatz zu den bekannten Strukturen mit konstanter Brechzahl im Pumplichtmantel, ein spezielles Brechzahlprofil gegeben ist, das die Lichtausbreitung so modifiziert, daß möglichst alle Lichtmoden leicht Energie austauschen können und damit auch die Energie solcher Moden, die den Kern nicht kreuzen, durch wiederholte Wechselwirkung zum Kern transportiert und dort absorbiert wird. Bestandteil der Lösung ist weiterhin das zusätzliche Erzeugen von Modulationen der Fasereigenschaften in Faserlängsrichtung, was bei geeigneter Dimensionierung den Energieaustausch der Moden untereinander wesentlich verstärkt.

[0011] Die Erfindung soll anhand der beigefügten Zeichnungen und erläuternden Betrachtungen für die Lichtausbreitung in solchen Fasersstrukturen im folgenden näher ausgeführt werden. Es zeigen:

[0012] Fig. 1a eine Faserlaserausbildung nach dem Stand der Technik mit einem exzentrisch angeordneten, laseraktiven Kern,

[0013] Fig. 1b verdeutlicht, daß auch bei einer Ausbildung nach Fig. 1a Strahlabschreibungen existieren, die den laser-

aktiven Kern nicht erreichen,

[0014] Fig. 1c den zu den Fig. 1a und 1b gehörigen Brechzahlverlauf von Faserkern, Pumplichtmantel und einer den Pumplichtmantel umgebenden, notwendigen Umhüllung,

[0015] Fig. 2 eine weitere Ausbildungsmöglichkeit eines Faserlasers nach dem Stand der Technik, bei der dem Pumplichtmantel ein D-förmiges Querschnittsprofil gegeben ist.

[0016] Fig. 3a eine Faserlaser- oder Faserverstärkerausbildung gemäß vorliegender Erfindung, bei der dem Pumplichtmantel ein parabelförmiges Brechzahlprofil gegeben ist,

[0017] Fig. 3b verdeutlicht den Brechzahlverlauf entsprechend eines Schnitts durch die Faser nach Fig. 3a,

[0018] Fig. 4a und 4b verschiedene Modenverteilungen im Pumplichtmantel,

[0019] Fig. 5 eine Ausführungsform gemäß der Erfindung zur weiteren Erhöhung der Einkopplung der Energie aller Moden des Pumplichtmantels in den Laserfaserkern.

[0020] Die Fig. 1a, 1b, 1c und 2 verdeutlichen nochmals den bisher bekannten Stand der Technik, bei dem eine laseraktive Faser exzentrisch von einem Pumplichtmantel umgeben wird; zugehörige Strahlenverläufe sind aus Fig. 1a, 1b und die dort zum Einsatz gelangenden Brechzahlprofile aus Fig. 1c ersichtlich. Fig. 2 zeigt eine weitere, bekannte Möglichkeit zur Erhöhung der Einkopplung des Pumplichtes in den laseraktiven Kern unter Verwendung eines Pumplichtmantels mit einem D-förmigen Querschnittsprofil. Weitere Erläuterungen hierzu, insbesondere die bei solchen Ausführungen bestehenden Nachteile, sind dem oben ausgeführten Stand der Technik entnehmbar.

[0021] Es ist üblich, die Ausbreitung des Lichtes in Lichteitfasern in der Form sogenannter Moden zu beschreiben. Mathematisch kann man das elektrische Feld einer solchen Mode in seiner räumlichen und zeitlichen Abhängigkeit beschreiben durch:

$$E(r, \Theta, z, t) = E_{lm}(r) \cdot \cos(l \cdot \Theta) \cdot \cos(\omega \cdot t - \beta_{lm} \cdot z),$$

wobei E_{lm} den radiusabhängigen Teil, $\cos(l \cdot \Theta)$ die azimutale Abhängigkeit und $\cos(\omega \cdot t - \beta_{lm} \cdot z)$ die zeitliche Ausbreitung in Richtung der Faserachse (z-Richtung) beschreibt. Die räumliche Verteilung der Lichtintensität in der Faser wird durch das Quadrat der ersten beiden Faktoren beschrieben. Die sogenannte Ausbreitungskonstante β_{lm} , die im allgemeinen für jede Mode verschieden ist, läßt sich aus den Faserparametern berechnen.

[0022] Der erste Schritt der erfindungsgemäßen Lösung, die in den Fig. 3a und 3b angedeutet ist, besteht nun darin, daß dem Pumplichtleiter ein Brechzahlprofil gegeben ist, bei dem möglichst viele Moden gleiche oder nahezu gleiche Ausbreitungskonstanten besitzen. Um dies zu erreichen, ist dem Pumplichtmantel zumindest in der unmittelbaren Nachbarschaft zum Laserfaserkern ein parabelähnlicher Brechzahlverlauf gegeben, wobei der Pumplichtmantel den Laserfaserkern konzentrisch umgibt. Bei Einhaltung solcher Profile existieren jeweils mehrere Gruppen von Moden mit untereinander nahezu gleichen Ausbreitungskonstanten. Innerhalb dieser Gruppen wird also die Energie sehr schnell ausgetauscht; da alle Gruppen auch Moden mit endlicher Lichtintensität in der Nähe des Zentrums enthalten, gelangt die Energie aller Moden durch mehrfache Wechselwirkungen in den Kernbereich und wird dort absorbiert. Im Gegensatz zu herkömmlichen Strukturen, wo manche Moden überhaupt nicht koppeln und damit für die Laserwirkung verlorengehen, löst die erfindungsgemäße Ausbildung also das Problem der möglichst vollständigen Absorption des Pumplichts bei gleichzeitig erhaltener Zylindersymmetrie.

[0023] Im folgenden sollen für einen typischen Ausführungsfall eines Faserverstärkers nähere Angaben getroffen werden. Eine mit Ge und Nd dotierte Glasfaser einer Länge von 10 m und einem Durchmesser von 4 μm ist von einem Pumplichtmantel mit einem Radius r_M von 100 μm umgeben. Dem Pumplichtmantel ist dabei ein parabelähnlicher Brechzahlverlauf

$$n_M(r) = n_0 \left[1 - \left[\frac{r}{r_M} \right]^2 \pm x \right],$$

wobei n_M die Brechzahldifferenz zum den Pumplichtmantel umgebenden Medium beschreibt, n_0 für die maximale Brechzahldifferenz in unmittelbarer Angrenzung an den Laserfaserkern steht.

[0024] Die in diesem Beispiel angegebenen Parameter bzw. sich ergebende Größen beziehen sich auf die vorteilhafteste Ausführung für $x = 0$. Im Rahmen der Erfindung kann x jedoch Werte von bis zu $\pm 0,2$ annehmen. Wesentlich im Rahmen der Erfindung ist, daß dieser Brechzahlverlauf zumindest in einer Umgebung des Laserfaserkerns eingehalten ist, die mindestens ein 20faches, im Beispiel ein 50faches, des Laserfaserkerndurchmessers beträgt. Die maximale Brechzahldifferenz im Pumplichtmantel beträgt im Beispiel 0,02.

[0025] Die Fig. 4a und 4b geben Beispiele für radiale Intensitätsverteilungen $E_{lm}(r)$ der Moden an. Der angedeutete, zentrische Kern kann nur Pumplicht aus solchen Moden entnehmen, die eine endliche Intensität am Kernort haben, wie im Falle der Fig. 4a. Die Energie der in Fig. 4b gezeigten Mode kann nur über Wechselwirkungsprozesse mit solchen Moden, wie in Fig. 4a gezeigt, zum Kern gelangen.

[0026] Die zum Einsatz gelangenden, parabelähnlichen Profile haben nun die Eigenschaft, daß die Differenzen der Ausbreitungskonstanten der erwähnten Modengruppen alle genähert ein ganzzahliges Vielfaches einer Konstante sind, die vom Fasermantelradius r_M , der absoluten Brechzahl und der Brechzahldifferenz abhängig ist, also:

$$\beta_{lm} - \beta_{kn} = \text{Konst.} \cdot i, \text{ mit } i = 1, 2, 3, \dots$$

[0027] Die Kopplungsprozesse zwischen den Moden gehen umso besser vor sich, je geringer die Differenzen der Ausbreitungskonstanten sind. Gemäß der Erfindung ist der Faserlaser oder Faserverstärker in einem zweiten Schritt entlang der Laserlichtausbreitungsrichtung mit einer periodischen Störung versehen, wobei ausgenutzt wird, daß Moden mit un-

terschiedlichen β_{lm} auch dann gut wechselwirken, wenn die periodische Störung in Ausbreitungsrichtung mit der Periode Λ vorhanden ist, die der Bedingung:

$$\beta_{lm} - \beta_{kn} = 2 \cdot \pi/\Lambda \text{ mit } l,m, k,n = 1, 2, \dots$$

5

genügt. Eine solche Störung kann mechanischer (Durchmesservariation, Krümmungen) oder optischer (Brechzahlvariation, Verluste, elektro- oder magnetooptische Effekte) Natur sein.

[0028] Wenn man dem Faserlaser oder Faserverstärker nun an gewissen Stellen eine periodische Eigenschaftsmodulation aufprägt, z. B. eine Brechzahlvariation, deren Periode Λ der Bedingung:

10

$$\Lambda = 2 \cdot \pi/\text{Konst.}$$

15

genügt (Fig. 5), dann koppeln auch alle benachbarten Modengruppen untereinander, und man erhält einen wesentlich stärkeren Energieaustausch als bei anderen Brechzahlprofilen, wo im Falle einer Modulation mit einer festen Periode nur einige einzelne Moden miteinander koppeln. Damit wird der Energieaustausch um ein Mehrfaches verstärkt, und man kann zu kürzeren Faserlängen kommen; da die optischen Verluste für Pump- und Laserlicht immer der Länge proportional sind, erreicht man mit der erfindungsgemäßen Ausbildung eines solchen Faserlasers auch höhere Leistungen als mit den bisherigen Anordnungen bei gleicher Pumpleistung. Vorteilhaft erfolgt die Anbringung genannter, periodischer Eigenschaftsmodulationen an Bereichen der Laserfaser, in denen das Pumplicht aus eng zur Kernmode benachbarten Moden bereits stark geschwächt ist, wodurch der Pumpprozeß durch eine schnellere Zuführung von Pumplicht wieder aufgefrischt und damit die Längenabhängigkeit des Verstärkungsprozesses reduziert wird. Dies führt wiederum zu einem verbesserten Pumpwirkungsgrad und einer Erhöhung der Laserleistung. Im Beispiel ist die Faser in Faserlängsrichtung mit einer periodischen Brechzahlmodulation $\Lambda = 3800 \mu\text{m}$ zumindest an einer ausgewählten Stelle über eine Länge von 10 cm versehen, die im Beispiel bevorzugt in der Mitte des Faserlasers oder Faserverstärkers lokalisiert ist.

20

25

[0029] Weiterhin kann die bisher beschriebene Ausbildung von einem weiteren, konzentrischen Mantel zum mechanischen und optischen Schutz umgeben sein. Die zylindersymmetrische Struktur des erfindungsgemäßen Faserlasers ermöglicht eine einfache Herstellung sowie Kompatibilität zu anderen, üblicherweise runden Fasern; der Pumplichtbereich mit dem parabelähnlichen Brechzahlverlauf gewährleistet eine wesentlich intensivere und schnellere Wechselwirkung des Pumplichts mit dem aktiven Laserkern als bisher bekannte Lösungen. Daher kommt man mit der vorliegenden Erfindung zu kürzeren Faserlängen, kleineren Lichtverlusten und/oder höheren Laserleistungen.

30

Patentansprüche

35

1. Faserlaser oder Faserverstärker, bestehend aus einem mit laseraktivem Material dotierten Faserkern, einem diesen umfassenden Pumplichtmantel und einer den Pumplichtmantel umgebenden Umhüllung, wobei der Faserkern konzentrisch von dem Pumplichtmantel umfaßt ist und dem Pumplichtmantel zumindest in der Nähe des Laserfaserkerns ein parabelähnlicher Brechzahlverlauf gegeben ist, dadurch gekennzeichnet, daß der parabelähnliche Brechzahlverlauf mindestens bis zu einem Abstand, beginnend von der Außenseite des Faserkerns, vom 20fachen des Faserkerndurchmessers des Faserlasers oder Faserverstärkers im Pumplichtmantel derart vorgesehen ist, daß der Brechzahlverlauf zumindest in der Nähe des Faserkerns gemäß einer Beziehung:

40

45

$$n_M(r) = n_0 \left[1 - \left(\frac{r}{r_M} \right)^2 \pm x \right],$$

50

festgelegt ist, wobei n_M die Brechzahldifferenz zum den Pumplichtmantel umgebenden Medium beschreibt, n_0 für die maximale Brechzahldifferenz in unmittelbarer Angrenzung an den Laserfaserkern steht und x Werte von bis zu $\pm 0,2$ annehmen kann und zusätzlich dem Faserlaser oder Faserverstärker in Ausbreitungsrichtung der Laserstrahlung in zumindest einem ausgewählten Teilgebiet des Pumplichtmantels eine Störung aufgeprägt ist, die mit einer Periode Λ vorgesehen ist, die der Bedingung:

55

$$\beta_{lm} - \beta_{kn} = 2 \cdot \pi/\Lambda \text{ mit } l,m, k,n = 1, 2, \dots,$$

wobei β_{lm} , β_{kn} für Ausbreitungskonstanten unterschiedlicher Moden stehen, genügt.

2. Faserlaser oder Faserverstärker nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die periodische Störung als Brechzahlvariation in den Pumplichtmantel eingebracht ist.

60

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

65

BEST AVAILABLE COPY

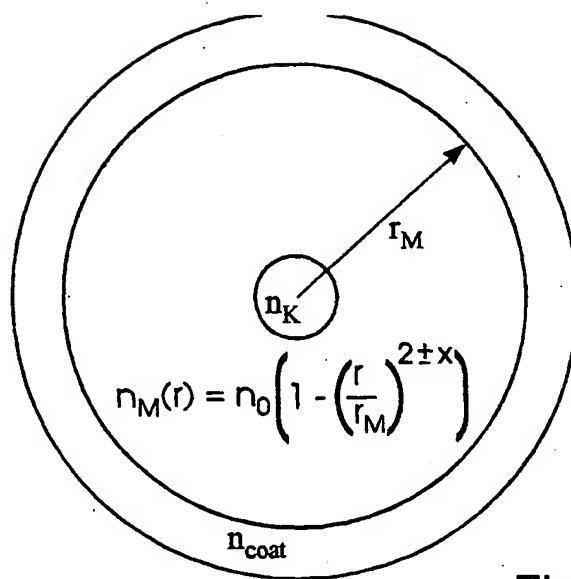


Fig. 3a

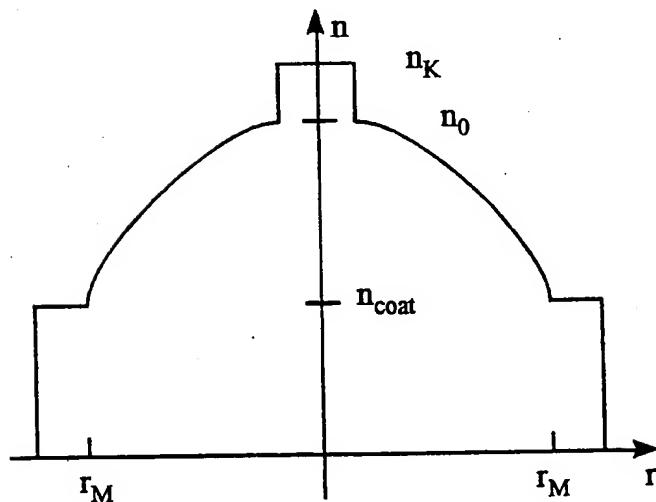


Fig. 3b

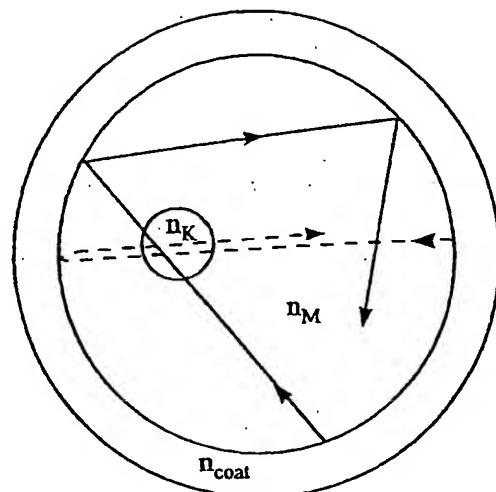


Fig. 1a

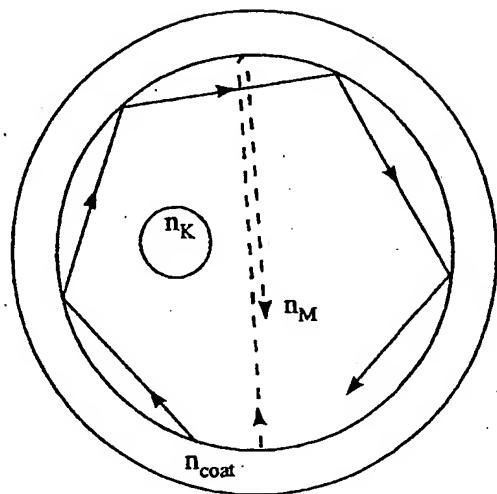


Fig. 1b

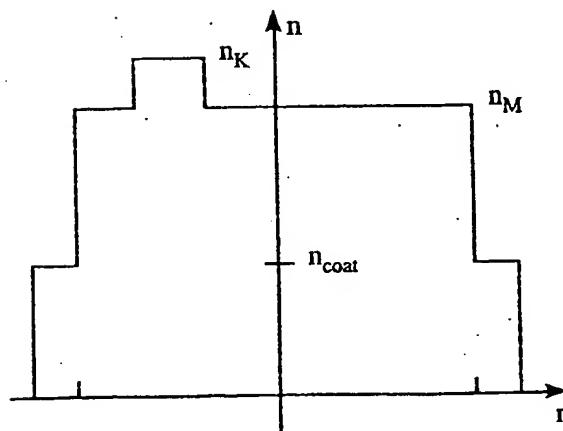


Fig. 1c

Stand der Technik

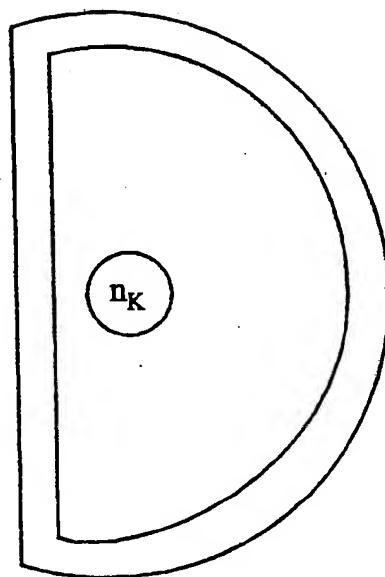


Fig. 2

Figuren 1a, 1b, 1c und 2
- Stand der Technik -

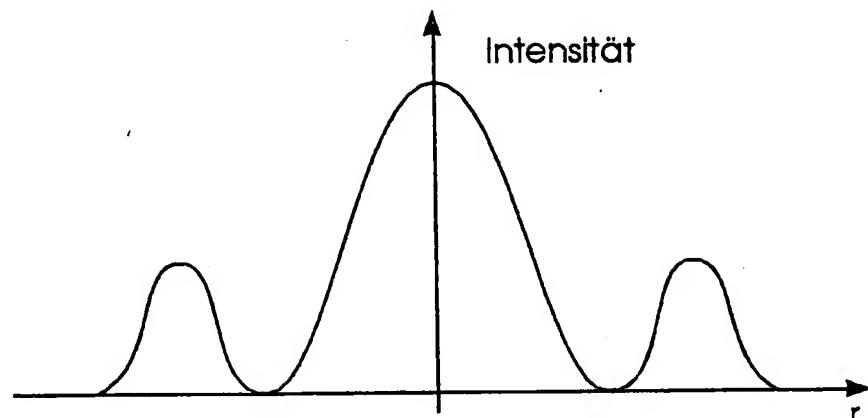


Fig. 4a

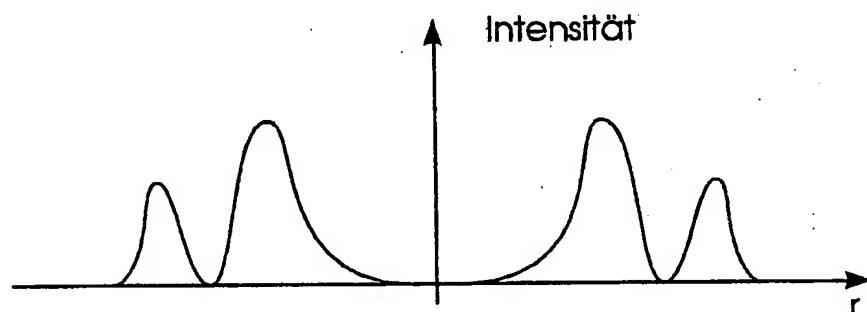


Fig. 4b

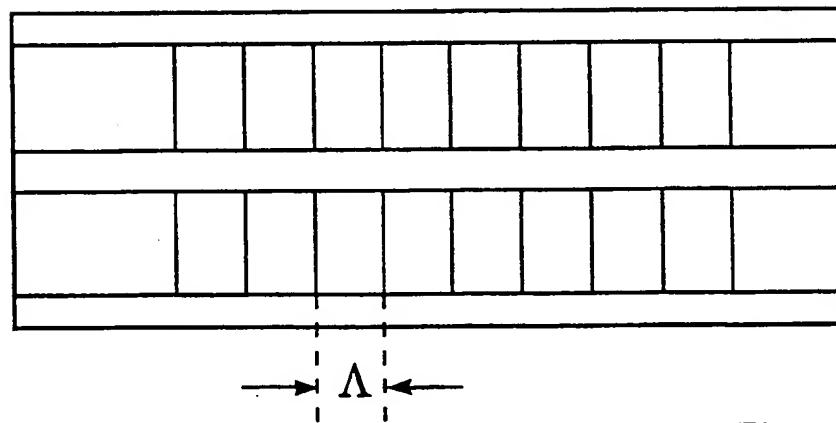


Fig. 5